

대규모 실내 모형실험을 통한 2-ARCH 터널의 거동 분석

Behaviour of a 2-arch Tunnel in a Large-scale Model Test

이철주¹⁾, C. J. Lee, 김지성¹⁾, J. S. Kim, 류남열²⁾, N. Y. Ryu

이상덕³⁾, S. D. Lee, 정경한⁴⁾, K. H. Jeong, 양재원⁵⁾, J. W. Yang

¹⁾ 삼성중공업 (주) 건설사업부 차장

²⁾ 삼성중공업 (주) 건설사업부 과장

³⁾ 아주대학교 토목설계공학과 교수

⁴⁾ (주) 도담 E & C 이사

⁵⁾ (주) 도담 E & C 과장

ABSTRACT: 사암 및 이암을 기반암으로 하는 산악지역에 건설되는 2-아치 (2-arch) 터널의 거동을 터널설계 단계에서 분석하기 위하여 대규모 실내 모형실험을 실시하였다. 터널이 시공될 예정인 지반과 유사한 지질공학적 특성을 가지는 콘크리트 블록을 이용하여 모형지반을 조성하였다. 모형실험은 중앙터널 (pilot tunnel) 굴착을 포함한 여러 단계의 굴착과정으로 구분하여 실시되었다. 또한 터널 공용기간 중 터널의 거동을 연구하기 위하여 터널굴착 완료 후 상재하중을 작용시켰다. 실험결과에 의하면 대부분의 지반변위는 중앙터널 굴착에 의해 발생했으며, 그 이후 터널 굴착단계에서의 변위발생은 미미한 것으로 나타났다. 또한 대부분의 지중변위는 0.25D 이내의 범위에서 발생하였다. 여기서 D 는 터널의 폭이다. 한편 실험결과를 분석하여 경암에 시공되는 2-아치 터널의 중앙벽체 (centre pillar)에 작용하는 하중에 대한 경험적인 공식을 제시하였다. 터널시공 완료 후 공용기간 중 상재하중이 작용할 경우 그 크기에 따라서는 터널굴착에 의해 발생한 것보다 더 큰 지중변위가 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 터널의 거동은 중앙벽체의 강성에 큰 영향을 받는 것으로 나타나 이를 터널설계에 반영하여 중앙벽체의 강성을 증가시켰다. 현재 터널시공을 위한 사전작업이 진행 중에 있으며, 터널의 굴착은 2005년 하반기에 실시될 예정이다.

KEY WORDS : 2-아치 터널, 모형실험, 중앙벽체, 중앙터널

1. 서론

최근 국내에서는 2-아치 (2-arch) 터널의 사용이 급증하고 있는데, 이는 2-아치 터널이 그동안 널리 사용되어온 2 차 병렬 터널에 비해 보다 환경친화적이기 때문이다. 또한 터널 출/입구부 인근의 구조물 등과의 연계성 확보상의 문제나 노선상의 제약이 있는 경우 2-아치 터널이 사용되고 있다

(왕이완 2001, 윤석렬 2002). 실무적인 관점에서 볼 때 2-아치 터널은 터널중심간의 거리가 매우 짧은 2 차 병렬터널의 한 경우로 가정할 수 있다. 그러나 2-아치 터널의 경우 아칭 효과 (arching effect)가 작고 중앙벽체 (centre pillar)가 터널의 변위 발생을 적극적으로 억제하는 등 기존의 2 차 병렬 터널과 비교하여 그 역학적 메커니즘이 상이하다고 할 수 있다. 국내의 경우 기존의 2-아치 터널은 주로 도심지에 시공되는 지하철 시공에 집중되어 있다 (윤석렬 2002). 일반적으로 2-아치 터널관련 기존의 연구는 대부분 일본에서 실시된 토사나 풍화암에 시공되는 2-아치 터널의 거동이다 (Marsuda 1998, 박동욱 2002, 윤석렬 2002, Celestino 등 2004). 그러나 산악지역에 시공되는 경암 이상의 지반조건에 시공되는 2-아치 터널의 거동에 대해서는 연구가 많지 않은 상황이다. 국내에서 시공되는 2-아치 터널의 경우 일본에서 적용되는 터널의 단면에 비해 중앙터널의 크기가 크고 중앙벽체의 단면적은 상대적으로 작다 (박동욱 2002, 김상균 & 박동욱 2003). 이는 국내의 지반조건이 일본의 지반조건 보다는 상대적으로 양호하기 때문이다. 또한 중앙벽체의 특성은 본선 터널의 거동에 큰 영향을 미친다고 알려져 있으나, 이에 대한 체계적인 설계 기법 역시 정립되어 있지 못하다. 한편 선행터널의 거동은 후행터널의 굴착에 영향을 받아 후행터널의 경우에 비해 더 큰 터널의 변형 및 부재력이 발생한다고 알려져 있으나, 이에 대한 연구도 부족한 실정이다 (왕이완 2001, 김상균 & 박동욱 2003).

본 연구에서는 경상남도 oo 지역에 시공예정인 대단면을 가지는 (187.6m²) 2-아치 터널의 거동을 실내모형을 통하여 분석하고 이를 터널설계에 반영하기 위하여 실시되었다. 터널 시공예정 지역은 사암 및 이암 등의 퇴적암으로 구성된 산악지역이다. 실제 터널은 23.9m 의 폭과 8.2m 의 높이를 가진다 (그림 1 참조). 터널의 시공은 국내에서 일반적으로 사용되는 NATM 공법을 적용하여 실시될 예정이다. 본선 터널의 굴착이전에 시공예정인 중앙터널 (pilot tunnel)의 직경은 약 10m 이다. 암반에 시공되는 터널의 거동은 암반의 지질공학적 특성에 크게 지배를 받기 때문에 이를 고려하여 모형실험에서는 원지반의 특성을 반영한 모형 지반을 조성하였다. 모형실험은 중앙터널의 굴착 및 좌우 본선터널의 굴착으로 구성되었다. 또한 공용 중 터널의 거동을 연구하기 위하여 모형지반의 표면에 상재하중을 작용시켰다. 실험을 통하여 분석된 터널의 거동은 성공적으로 터널설계에 반영되었으며, 현재 터널의 시공을 위한 준비작업이 진행 중이며 2005년 하반기부터 터널 시공이 진행 될 예정이다.

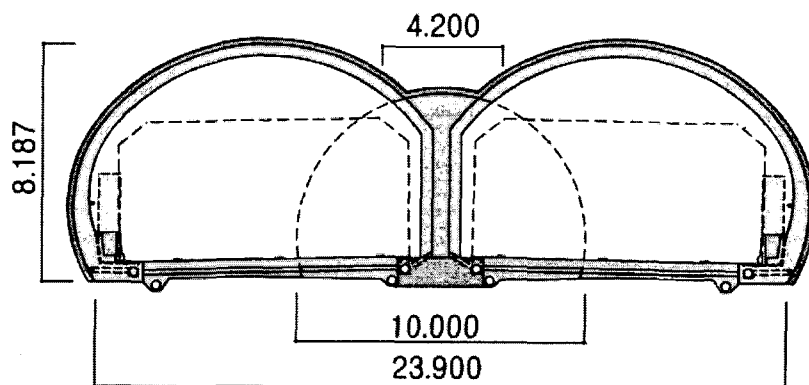


그림. 1 원형터널 (prototype tunnel)의 단면도 (단위: m)

2. 모형실험

2.1 실험의 요약

모형실험에서 사용된 지반의 크기는 3m×3m 이고 그 폭은 0.27m 이다 (그림 2). 모형터널은 중앙터널 및 좌/우의 터널로 구분되어 있으며, 벽체의 마찰을 감소시키기 위하여 벽면에 그리스를 칠하여서 전단응력의 발생을 최소화 시켰다. 한편 실험에서는 모형의 크기를 축소율 (scaling factor) 20 을 가정하여 이를 원형터널 (prototype tunnel)에 적용시켜 중앙터널의 직경을 0.54m, 높이를 0.36m 으로 축소시켰다. 본 실험에서는 실제 지중응력조건을 구현하기 위하여 원형터널이 받게 되는 수직응력과 유사한 30.9 tf/m² (prototype: 617.3 tf/m²) 의 상재하중을 작용시켰다. 한편 수평방향에 대해서는 토압계수 1.5 (현장 수압과쇄 실험: 1.52)를 가정하여 46.3 t/m² (prototype: 925.9 tf/m²)의 수평응력을 작용시켰다.

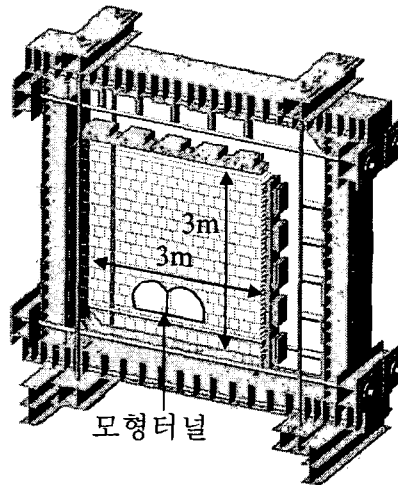


그림. 2 모형지반 및 터널의 전경 (폭: 0.27m)

2.2 모형지반 조성

암반 (rock mass)은 일정하지 않으며 불연속면이 존재하게 된다 (Hoek & Brown 1980). 따라서 터널 및 터널주변 지반의 거동은 암반의 지질공학적 특성에 크게 영향을 받게 된다 (GEO 1992). 본 실험에서는 퇴적암의 특성을 고려하기 위하여 콘크리트로 블록을 제작하여 모형지반을 조성하였다. 실내실험을 통해 산정한 모형지반의 내부마찰각은 32 도이며, 점착력은 없는 것으로 측정되었다. 한편 모형지반의 중량은 2020 kgf/m³이며 일축압축강도는 254 kgf/cm² 이다. 또한 지반의 공학적인 특성을 모형지반에서 구현하기 위하여 모형지반의 RMR(rock mass rating, Bieniawski 1984)을 실제지반의 평균 RMR 값과 유사한 약 67 로 조정하였다. 따라서 모형지반은 RMR 분류법에 의하면 II- class 의 good rock 으로 분류될 수 있다.

2.3 중앙벽체

실제 터널의 굴착에서는 중앙터널 굴착 후 중앙벽체가 설치되지만, 본 실험에서는 중앙터널의 굴착에 의해 발생하는 암반하중을 측정하기 위하여 강재로 제작된 중앙벽체 및 load cell 을 지반조성 이전에 설치하였다 (그림 3). 중앙터널의 굴착완료 후 load cell 에 작용하는 하중이 0 이 되도록 커플링을 조정하여 좌/우 터널의 굴착에 의한 하중의 증가분을 측정하였다.

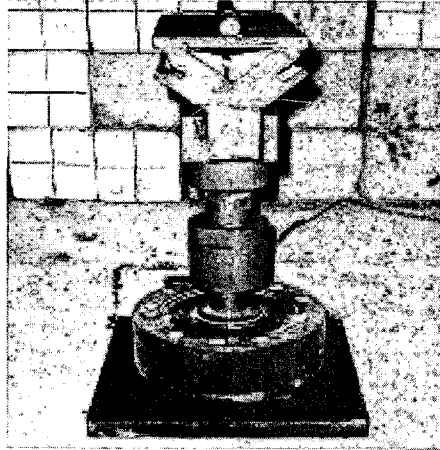


그림. 3 중앙벽체 (centre pillar)

2.4 터널라이닝

터널의 굴착이 완료된 이후 터널 굴착면에 터널라이닝을 설치하였다. 라이닝에는 LVDT 를 설치하여 공용하중 작용시 내공변위의 변화를 측정하였다. 라이닝은 강판으로 제작되었으며 그 두께 (6mm)는 식 (1)을 이용하여 산정하였다. 이때 실제 터널 라이닝의 두께는 0.4m, 1 회 굴진장은 1.6m 으로 가정하였다. $E_m \times I_m = E_p \times I_p / n^4$ (여기서 E는 탄성계수, I는 단면 이차모멘트, m은 모형, p는 실물, n은 축소율) (식 1)

2.5 실험 순서

모형실험은 아래의 단계에 의거하여 실시되었는데, 크게 중앙터널의 굴착, 선/후행 터널의 굴착 및 공용 중 상재하중의 작용 등으로 구분할 수 있다.

- A: 모형지반의 조성
- B: 중앙터널 상부의 굴착
- C: 중앙터널 하부의 굴착 (그림 4a)
- D: 중앙벽체에 작용하는 하중이 0 이 되도록 조정
- E0: 왼쪽 (선행) 터널의 상반 굴착
- E: 오른쪽 (후행) 터널의 상반 굴착
- F0: 왼쪽 (선행) 터널의 하반 굴착
- F: 오른쪽 (후행) 터널의 하반 굴착 (터널굴착 완료) (그림 4b)
- G: 상재하중의 작용 (터널 공용 중)

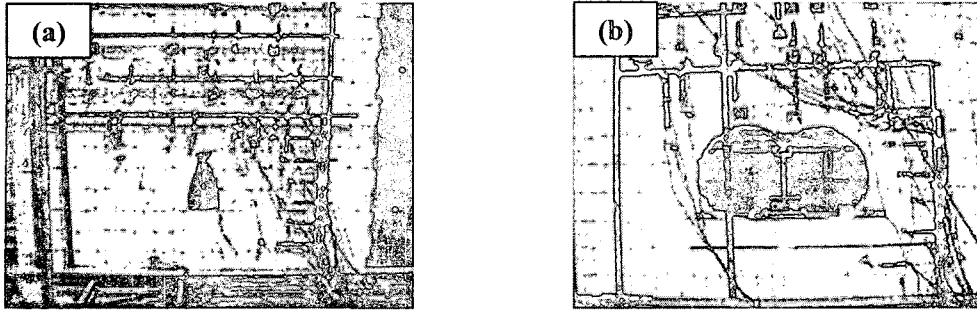


그림. 4 터널 굴착 전 (a) 및 굴착 완료 후 (b)의 전경

2.6 계측

실험도중 터널굴착에 의해 발생하는 지반의 변위 및 공용 중 상재하중의 작용에 의한 터널 라이닝의 변위는 LVDT 를 이용하여 측정하였다. 지중변위를 측정하기 위해 설치한 LVDT 의 위치는 그림 5 에 나타나 있으며, 터널 라이닝에 설치한 LVDT 의 위치는 그림 6 에 나타나 있다. 또한 위에서 언급한 바와 같이 중앙벽체에 가해지는 하중은 load cell 을 이용하여 측정하였다.

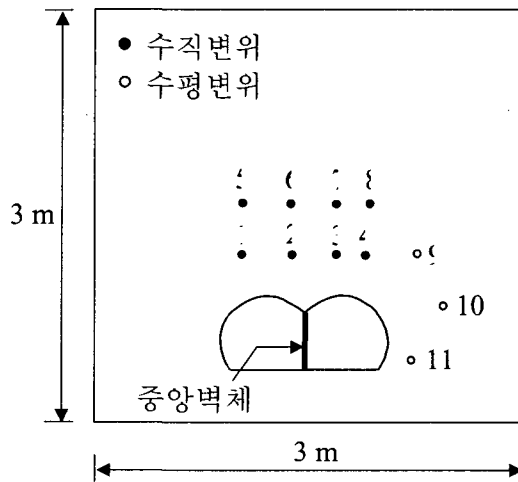


그림. 5 모형 지반 내에 설치된 LVDT의 위치

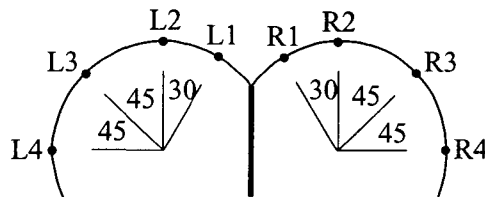


그림. 6 라이닝에 설치된 LVDT의 위치 (단위: 도)

3. 실험결과 분석

3.1 지중에 발생한 수직변위

터널 굴착단계별 지중에 발생하는 수직변위는 터널 crown 에서 0.25D 및 0.50D 에 위치한 LVDT 를 이용하여 측정하였다, 이때 D 는 터널의 폭이다. 각 LVDT 의 위치는 그림 5 에 나타나 있다. 그림 7 은 각 굴착단계 별 지반의 수직변위의 변화를 보여주고 있다. 그림 7 에 의하면 지반조성 후 중앙터널의 상부 굴착 (stage B) 에 의해 가장 큰 수직변위가 발생하고 있고, 그 이후 단계에서는 매우 작은 변화만을 보여주고 있다. 한편 0.25 D 의 위치에서 측정한 지반의 변위 (그림 7a) 는 0.50 D 의 위치에서 측정한 지반의 변위 (그림 7b) 보다 전반적으로 크게 나타나고 있으며, 대체로 지반의 변위는 주로 0.25 D 의 범위에서 발생하고 있다. 이러한 사실로부터 록볼트의 길이는 0.25 D 이상이 되어야 효과적으로 그 기능을 발휘할 수 있을 것으로 추정할 수 있다. 일반적으로 후행터널의 굴착에 의해 선행 터널부에는 10-30%의 변위 증가가 있는 것으로 알려져 있다 (김상균 & 박동욱 2003). 그러나 본 실험 결과는 이와 상이하여 후행 터널 굴착 시 선행 터널에 별다른 변위변동이 관찰되지 않았다. 그 원인은 명확하지 않지만, 경암에 시공되는 터널의 거동은 토사나 풍화암에 시공되는 터널의 거동과 다르기 때문인 것으로 추정된다. 이는 중앙벽체의 강성이 충분하여 선/후행 터널의 굴착에 의한 지반의 변위 발생을 억제하고, 후행 터널 굴착 시 선/후행 터널의 상호거동을 감소시키는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 본 실험을 통해 관찰된 제한적인 결과만으로는 확정적인 결론을 내리기가 어려울 것으로 판단되어 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 예상된다.

3.2 지중에 발생한 수평변위

터널 측면의 안정성을 검토하기 위하여 터널의 오른쪽에 LVDT 를 설치하여 각 단계별 지반의 수평변위를 측정하였다 (그림 6 참조). 그림 8 에 나타나 있듯이 대부분의 지반변위의 발생은 중앙터널 상부의 굴착에 의해 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 터널굴착에 따른 지반의 수직변위 변화 양상과도 일치한다. 또한 지반의 수평변위는 터널 invert 에서 멀어질수록 크기가 감소하고 있다.

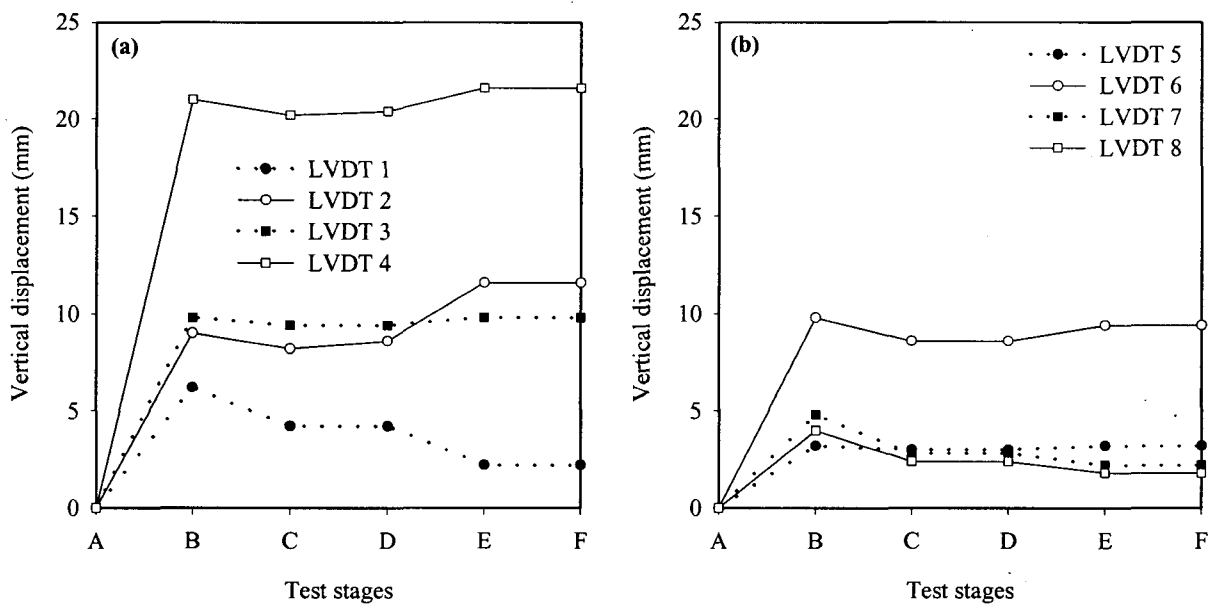


그림. 7 굴착 단계별 모형지반내의 수직변위 변화 (prototype scale)

일반적으로 터널의 굴착에 의해 지반의 응력상태는 변화되어 주응력면이 변화하게 될 것이다. 이는 아칭을 통해 지중의 응력이 재분배되기 때문이다. 따라서 지반변위의 발생 양상으로부터 유추해 볼 때 대부분의 지중응력 변화는 중앙터널 굴착과 수반하여 발생하고 그 이후는 대체로 일정할 것으로 예상된다. 또한 터널의 거동은 중앙벽체의 강성에 크게 영향을 받는 것으로 판단된다. 따라서 중앙터널의 굴착 후 중앙벽체를 좌우 터널의 굴착이전에 설치를 완료하여 본선터널 굴착에 의해 발생하는 암반하중을 지지해야 지반의 변위발생을 효율적으로 억제할 수 있을 것으로 기대된다.

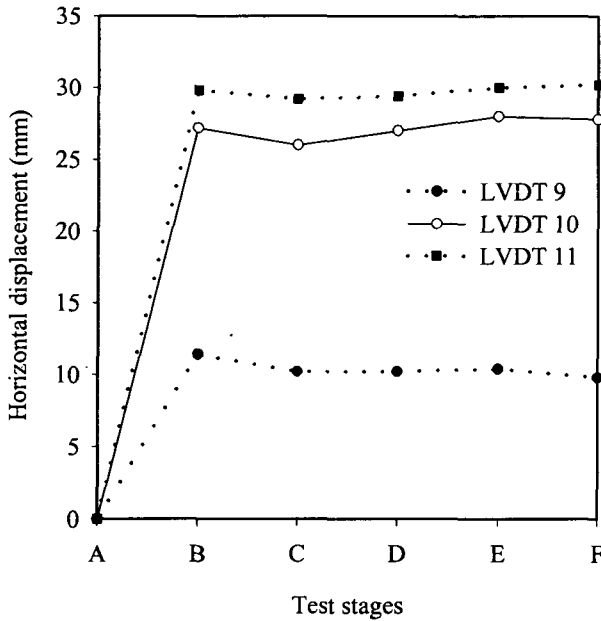


그림. 8 굴착 단계별 수평변위의 변화 (prototype scale)

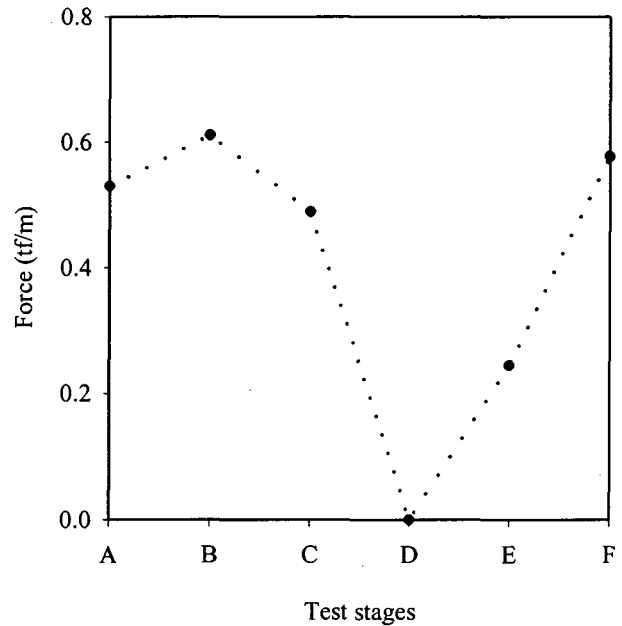


그림. 9 굴착 단계별 중앙벽체에 작용하는 수직하중 (model scale)

3.3 중앙벽체에 작용하는 하중

앞서 언급한 바와 같이 2-아치 터널은 2 차 병렬 터널의 특수한 경우로 가정할 수 있다. 그러나 2-아치 터널의 경우 터널중앙부에 중앙벽체가 있어서 아칭 현상이 2 차 병렬터널에 비해 감소하게 된다. 따라서 터널중앙부의 변위 발생을 억제하기 위해서는 충분한 강성을 가진 중앙벽체를 설치하여 암반하중을 지지할 수 있도록 해야 한다. 그림 9 는 터널굴착에 따라 중앙벽체에 작용하는 단위폭당 하중의 변화를 보여주고 있다. 여기서 중앙터널 굴착 이전 (stage A)에 발생한 0.58 tf/m 의 하중은 모형지반의 자중 및 상재하중의 작용에 의한 것으로 터널의 굴착과는 무관하다고 할 수 있다. 실험결과는 중앙터널의 상반 굴착 (stage B)에 의해 약 0.08 tf/m 의 하중이 증가하고 있다. 이는 중앙터널의 상반 굴착에 의해 발생하는 지반의 변위와 관련이 있는 것으로 추정된다. 중앙터널의 굴착완료 후 중앙벽체의 하중이 0 이 되도록 커플링을 조정하였다 (stage D). 이는 중앙벽체 설치 이후 벽체에 가해지는 실제 하중을 측정하기 위해서이다. 중앙터널 굴착의 경우와는 반대로 선/후행 터널의 굴착 (stages E-F)에 의해서는 중앙벽체에 매우 큰 하중이 작용하고 있다. 이때 마지막 단계에서 (stage F) 발생하는 하중인 0.578 tf/m (prototype: 231.2 tf/m)는 중앙벽체가 지지해야 할 하중이다.

선/후행 터널의 굴착에 의한 중앙벽체의 하중 증가는 중앙벽체가 선/후행 터널 굴착 시 변위의 발생을 효과적으로 억제하고 있기 때문인 것으로 판단되며, 이는 선/후행 터널의 굴착 시 작은 변위 발생이 관측된 위의 결과와도 일치한다.

Matsuda (1998)는 토사 및 풍화암 지반에 시공되는 2-아치 터널의 중앙벽체에 작용하는 하중에 대한 경험식을 모형지반의 단위중량, 암반의 토피고, 좌우터널의 중심간의 거리 (W) 및 터널의 폭 (D)을 이용하여 제안 하였다. 그러나 앞서 언급했듯이 경암에 시공되는 2 아치 터널의 경우에 대한 연구는 상대적으로 제한되어 있다. 본 연구에서는 중앙벽체에 가해지는 하중 (P)에 대한 계측자료를 이용하여 RMR 60 이상인 지반에 적용할 수 있는 하중을 아래의 식 (2) 와 같이 제안하고자 한다.

$$P = \gamma \times W \times 0.4D \quad (\text{여기서 } \gamma \text{은 지반의 단위중량}) \quad (\text{식 2})$$

이는 터널의 토피고가 터널의 폭보다 큰 경우 Matsuda (1998)이 제안한 식인 $P = \gamma \times W \times D$ 에 비해 60% 감소된 값이다. 본 경험식은 모형실험을 통해 추정된 값이므로 이를 설계에 바로 적용하는 데는 한계가 있으나, 경암에 시공되는 2-아치 터널의 중앙벽체 설계 시 유용한 참고자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

3.4 공용 중 터널의 거동

일반적으로 NATM 공법으로 시공된 터널의 경우 콘크리트 라이닝은 구조적인 하중을 거의 받지 않는 것으로 가정할 수 있다. 이는 록볼트, 쇼크리트 및 강지보 등의 지보재가 모든 하중을 지지하기 때문이다. 그러나 터널굴착 완료 이후 지보재의 기능저하, 터널주변의 지하수위 변동, 지반의 creep 거동 및 지반의 풍화 진행 등의 요인에 의해 터널굴착과는 관련없는 2 차의 외부하중이 작용할 경우 하중의 일부가 라이닝에 작용하게 된다. 이에 따라 본 실험에서는 공용 중 터널의 거동을 분석하기 위하여 토압계수 1.5 의 조건에서 $30.9 - 123.5 \text{ tf/m}^2$ 의 수직응력 (surface loading)을 단계별로 모형지반의 표면에 작용시켰다.

그림 10 은 상재하중의 증가에 따른 라이닝의 내공변위 변화를 보여주고 있다. LVDT 의 위치는 그림 6 에 나타나 있다. 한편 지반의 변위를 라이닝의 변위와 비교하기 위하여 LVDT 1, 3 의 계측자료도 포함시켰다 (그림 5). 이때 지반의 변위는 상재하중에 의해 발생한 순수 증가분만을 고려하였다. 그림 10 에서 (+)는 터널의 중심을 향한 변위로서 터널내공이 감소된다는 의미이다. 대체적으로 터널의 변위는 상재하중의 증가에 의해 거의 선형적으로 증가하고 있으나 터널중심에 대하여 대칭적이지 않다. 이는 터널굴착에 의한 교란의 영향인 것으로 판단된다. 터널 라이닝의 경우 좌/우 터널에서 각각 L1 및 R3 에서 최대 변위가 발생하고 있으며, 최소변위는 L2, R2 에서 발생하고 있다. 한편 지반변위 (LVDT 1, 3)의 크기는 라이닝의 최대 변위와 유사하다고 볼 수 있다. 따라서 지반에 발생하는 변위의 크기는 일반적으로 라이닝의 변위보다 더 크다는 사실을 알 수 있다. 또한 터널의 공용 중 발생하는 지반의 변위는 터널굴착에 의한 변위보다 더 클 수도 있다는 사실을 보여주고 있다. 결론적으로 볼 때 경우에 따라서는 터널 공용기간 중 큰 터널 내공변위 및 지반변위가 발생할 가능성이 있는 것으로 예상할 수 있다.

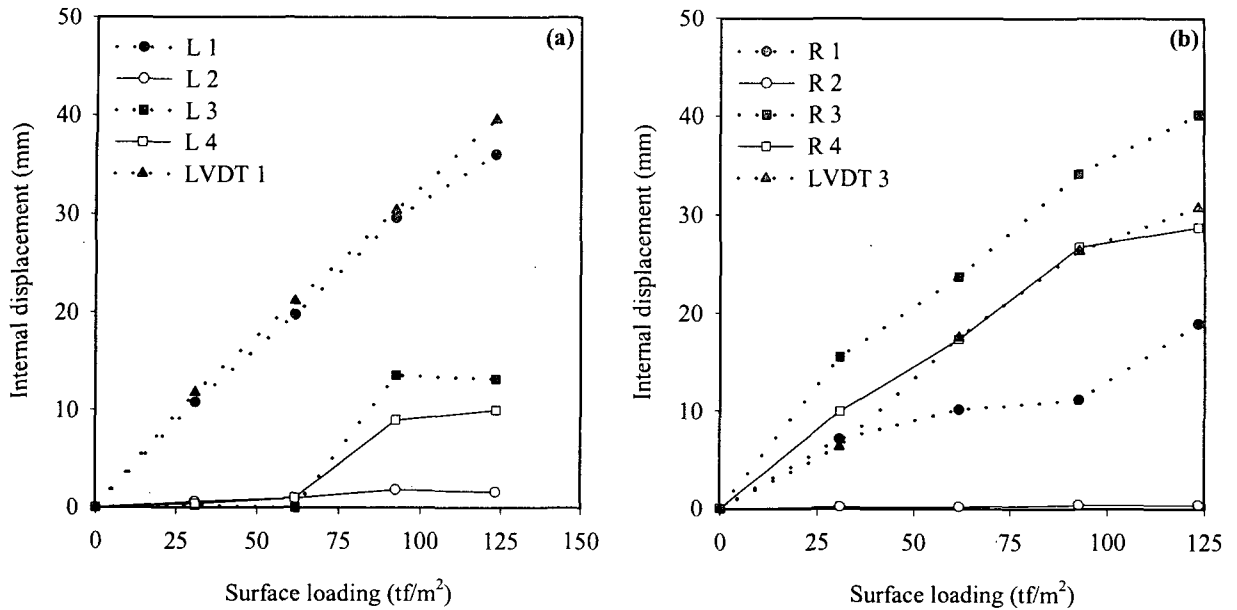


그림. 10 공용하중 작용에 의한 라이닝의 내공 변화 (변위: prototype scale)

4. 결론

본 연구에서는 대규모 모형실험을 실시하여 대단면 2-아치 터널의 거동을 분석하였다. 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 터널의 굴착에 의한 지반의 변위는 주로 0.25D의 범위에서 발생하고 있다. 따라서 터널막장면에 설치되는 록볼트의 길이는 0.25D 보다는 길어야 할 것으로 판단된다. 또한 터널굴착에 의한 지반변위는 대부분 중앙터널 굴착에 의해 발생하며, 본선터널의 굴착에 의한 지반변위의 발생은 중앙벽체에 의해 억제되는 것으로 분석되었다.
2. 선/후행 터널 굴착 시 발생하는 암반하중은 대부분 중앙벽체가 지지하는 것으로 분석되었다.
3. 본 연구에서 관측된 결과에 의하면 RMR 60 이상인 2-아치터널의 중앙벽체에 가해지는 단위폭 당 하중(P)은 $\gamma \times W \times 0.4D$ 의 경험식으로 표현될 수 있으나, 향후 더 많은 연구를 실시하여 이를 확인할 필요가 있을 것으로 판단된다.
4. 터널 사용기간 중 터널은 외부하중의 작용에 의해 큰 변위가 발생하는 것으로 관측되었고, 경우에 따라서는 터널굴착에 의한 것보다도 더 큰 변위의 발생도 가능한 것으로 분석되었다.
5. 실험에서 분석된 결과를 터널설계에 반영하여 중앙벽체의 강성을 증가시켰으며, 터널의 시공은 2005년 후반기에 시작되는 것으로 예정되어 있다.

감사의 글

본 연구는 삼성중공업 (주) 건설사업부의 의뢰를 받아 아주대학교 지반공학 연구실에서 실시한 모형실험 결과를 바탕으로 작성되었습니다 (아주대학교 토목설계공학과 보고서 2004). 모형실험을 성공적으로 수행한 아주대학교 지반공학연구실 연구원들의 노고에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김상균 & 박동욱 (2003). 수치해석적 접근을 통한 2 Arch 터널의 거동양상 고찰, 한국지반공학회 봄학술대회, pp225-232.
2. 박동욱. (2002). 도로터널에서 2 Arch 터널의 적용성과 문제점 개선사항에 대한 연구, 한양대학교 대학원 석사학위논문
3. 아주대학교 지반공학 연구실. (2004). 대단면 터널굴착에 따른 원지반 거동특성 연구 보고서. 삼성중공업 (주) 제출보고서.
4. 왕이완. (2001). 도로에서 2 arch 터널의 적용성, 대한터널학회 정기학술발표회, pp141-152.
5. 윤석렬. (2002). 시공사례분석을 통한 대단면 twin 터널의 설계방법 연구, 한양대학교 대학원 석사학위논문
6. Bieniawski, Z.T. (1984). Rock mechanics design in mining and tunnelling, Balkema: Rotterdam.
7. Celestino, T.B, Re, G, Leite, R, Rocha, H.C. & Vasconcellos, C.A. (2004). The design and construction of the Vila Madalena station for the São Paulo Subway. Underground space for sustainable urban development. Proc. of. 30th ITA-AITES World Tunnel Congress. (Edited by Shirlaw, Zhao & Krishnan). (1) pp350-357.
8. Geotechnical Engineering Office (GEO). (1992). Guide to cavern engineering. Geoguide 4. Civil Engineering Department, Hong Kong.
9. Hoek, E. & Brown, E.T. (1980). Underground excavation in Rock. Instn. of Mining & Metallurgy.
10. Matsuda, T. (1998). Ground behavior and settlement control of twin tunnels in soil ground. Tunnels and Metropolises, pp1193-1198.